空气隔热夹层围岩温度场数值计算及试验分析

李文菁[1,2],邹声华[3],杨万鑫[3],胡琦[3]

(1.湖南科技大学资源环境与安全工程学院,411201 湘潭;2.湖南工程学院建筑工程学院,411004 湘潭;
3.湖南科技大学土木工程学院,411201 湘潭)

摘 要:随着矿产资源的开采深度日益增加,矿井高温热害问题日益突出,研究新的隔热技术、隔热工艺已经成为控制围岩传热的重要研究方向。鉴于空气夹层结构在建筑围护结构和寒区隧道中的保温隔热作用,提出应用封闭空气夹层控制巷道围岩散热量的方法。采用 ANSYS Fluent 软件求解了含空气夹层的围岩温度场分布。通过相似理论设计了含空气夹层的巷道围岩温度场测试试验台,并应用试验结果对数值计算结果进行了验证,两者具有很好的吻合性,证明了 ANSYS Fluent模拟结果的正确性。应用计算模拟结果和试验结果分析了围岩内温度场非稳态传热过程中的变化规律,发现因空气夹层内自然对流现象的存在,顶部、中部和底部围岩温度场发展并不一致,但其调温圈无因次半径均小于无隔热巷道。并通过实例计算研究,发现空气层厚度对围岩散热量影响较小,空气夹层厚度从 2 cm 增加到 20 cm 时,围岩单位长度散热量仅下降 5%;围岩导热系数对空气夹层隔热率有着显著的影响,导热系数为 0.59 W/(m·K)比围岩导热系数 6.18 W/(m·K)时夹层隔热率衰减速率快。封闭空气夹层隔热结构适用于新掘进巷道或高温隧道的临时性隔热或围岩导热系数高的固定或半固定作业地点的永久性隔热。

关键词:围岩散热;隔热技术;空气夹层;非稳态传热;围岩温度场

中图分类号:TD727　　**文献标志码:**A

Simulation and experimental analysis for temperature field of roadway surrounding rock with air layer thermal insulation

LI Wenjing[1,2], ZOU Shenghua[3], YANG Wanxin[3], HU Qi[3]

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China; 2. Architectural Engineering College, Hunan Institute of Engineering, 411004 Xiangtan, China; 3. Civil Engineering College, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China)

Abstract: With the increasing mining depth of mineral resources, the problem of thermal hazard in high temperature underground space is increasingly serious. The research on new heat insulation technology and heat insulation technology has become an important research direction to control the heat transfer of surrounding rock. Based on the effect of air layers on heat insulation in building envelope and tunnel, the method of applying enclosed air layer to control the heat dissipation of surrounding rock is proposed. The

收稿日期:2021-05-25　　**修回日期:**2022-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51274098;51134005);湖南省教育项目(No. 21B0660)

通信作者:邹声华,博士,教授。E-mail:784923017@qq.com

引用格式:李文菁,邹声华,杨万鑫,等.空气隔热夹层围岩温度场数值计算及试验分析[J].应用力学学报,2022,39(2):394-402.

LI Wenjing, ZOU Shenghua, YANG Wanxin, et al. Simulation and experimental analysis for temperature field of roadway surrounding rock with air layer thermal insulation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):394-402.

temperature field distribution of surrounding rock with air layer is solved by ANSYS Fluent software. Based on the similarity theory, an experimental platform for the temperature field of roadway surrounding rock with air layer was designed. The numerical results were verified by the experimental results, which showed that the two results were in good agreement. So, the simulation results of ANSYS Fluent are reliable. Base on experimental results and the simulation results the variation law of the temperature field in surrounding rock in unsteady heat transfer is analyzed. It is found that the temperature field at the top, middle and bottom of the surrounding rock is different because of the existence of natural convection in the air layer, and the dimensionless radius of the temperature regulating ring is less than that of the normal roadway. The influence of the thickness of air interlayer on the heat release of surrounding rock is studied by example calculation. It is found that the thickness of air layer has little effect on heat loss of surrounding rock. When the thickness of small air layer increases from 2 cm to 20 cm, the heat loss per unit length of surrounding rock only decreases by 5%. The thermal conductivity of surrounding rock has a significant influence on the thermal insulation rate of air interlayer, the decay rate of the heat dissipation of the thermal conductivity of 0.59 W/(m · K) is faster than that of 6.18 W/(m · K). The enclosed air layer insulation structure is suitable for temporary insulation of new tunneling roadway or permanent insulation of fixed or semi-fixed operation site with high thermal conductivity of surrounding rock.

Key words: heat dissipation of surrounding rock; heat insulation; air layer; unsteady heat transfer; surrounding rock temperature field

随着矿井开采深度的增加,受到高温热害威胁的矿井日益增多,矿井高温热害已成为制约矿井安全高效开采的重大问题。全国千米深煤矿井在2015 年已达 80 余座,千米深金属矿井约 32 座,最深的为辽宁抚顺红透山铜矿,已达 1 600 m[1],其原岩温度大多超过 35 ℃,接近 40 ℃,个别甚至达到 50 ℃,许多矿井早已处于二级热害区[2]。2014 年张习军对 132 对夏季采掘工作面超过 30 ℃的矿井进行了统计,选择其中采用空调制冷措施的 61 对热害矿井的致热因素进行了分析,发现主要热源为围岩散热的为 41 对,占 67.2%[3],因此研究如何控制围岩散热量对深部矿井热害治理具有重要意义。

2019 年蔡美峰院士提出,为提高深井降温效率,应着力发展主动降温技术的思想:研发新型隔热材料,采用新工艺、新技术对巷道进行热隔离,并辅以人工制冷降温技术,可以取得良好的降温效果[4]。巷道围岩套行结构为目前主要的主动型隔热技术之一,主要有两种:空气套行式和填充套行式[5],近年来我国大量学者对注浆和喷涂等填充套行式隔热技术进行了大量研究。庞建勇、孙广龙等在 2016 年[6-7]研究了不同隔热材料的隔热效果;张源[8](2013 年)、宋东平[9](2017 年)和 YAO[10](2021 年)等则深入分析了隔热层对围岩温度场的影响规律。但对空气套行式隔热方式的研究较少,邹声华在 2016 年首次提出一种流通空气夹层隔热分流的非人工制冷技术,并应用于湖南唐洞煤矿掘进巷道中,使主巷道的空气温度降低了 5.5 ℃[11]。

采用空气夹层隔热的方法在隧道和建筑隔热领域均有应用,特别是其在建筑领域的应用,方式多样有双层玻璃、双面屋顶、通风屋顶等结构,其隔热效果突出[12-13]。在隧道隔热中, 挪威从 20 世纪 60 年代开始探索, 经过不同尝试, 2002 年挪威公路管理局提出了成熟的离壁式衬砌防冻结构, 使用预制混凝土衬套和保温层在隧道与岩石之间构建出封闭空气夹层, 成功应用于 Rælingen 等 20 余条公路和海底隧道中[14], 长度由 500 ~ 3 850 m 不等。离壁式衬砌结构通过加入经过防水处理的预制混凝土衬套和聚乙烯隔热板, 在巷道与围岩之间构成空气夹层, 以5 ~ 6 m 为一个工作段, 具有安装简单、速度快(Rælingen 高速公路中最大施工速度达250 m/100 h)、撤换方便、造价相对低(针对截面面积在65 ~ 110 m^{2}的隧道,其成本约为 65 ~ 80 美元/m^2)的特点。鉴于此,作者引入了封闭空气夹层结构对高温矿井或隧道进行隔热,通过 ANSYS 建模分析了布置封闭空气夹层结构后巷道围岩温度场分布,并利用相似模拟实验平台对模拟结果进行验证和分析,以期获得准确的模拟计算方法和围岩温度场变化规律,最后通过实例对其隔热效果和影响因素进行了分析。

1 空气夹层隔热巷道围岩传热模型

1.1 空气夹层隔热巷道围岩物理模型

为了研究空气夹层隔热结构在地下工程中的隔热效果,先将其抽象成同心环结构,通过数值模拟和试验验证,深入分析设置隔热层后高温矿井围岩温度场分布及其不稳定传热系数的变化规律。如图1所示,通过加入隔热板,在巷道与围岩之间构成空气夹层,此方式不仅增大了巷道周壁的传热热阻,隔断了辐射热,降低了围岩向巷道的散热量,还可以在湿润巷道中隔绝湿润壁面向巷道散湿。

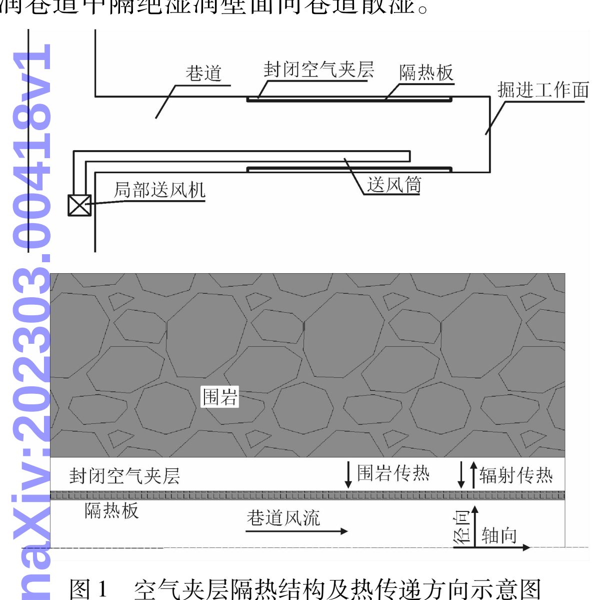


图1 空气夹层隔热结构及热传递方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air layer insulation structure

1.2 空气夹层隔热巷道围岩数学模型

在针对围岩温度场的研究中,通常将巷道视为无限大空心圆柱[9,15],而存在封闭空气夹层的巷道则可视为一个同心环圆柱体。为了便于研究,对具有封闭空气隔热层的巷道围岩物理模型进行简化和假设:①巷道为空心圆柱;②封闭空气夹层为环隙,环隙内空气为不可压缩流体,满足 Boussinesq 假设;③巷道围岩是均质的,热物性各向同性、热物性参数恒定,且不考虑各层材料之间的接触热阻;④不考虑巷道壁面的水分蒸发;⑤巷道内风流温度和巷道内风速恒定,不考虑热空气夹层两侧(围岩内壁和隔热板外壁面)之间的热辐射的作用。且巷道围岩沿轴向的温差很小,可忽略轴向传热,因此围岩温度场可简化为二维非稳态温度场。通常情况下,围岩温度场分布为中心对称的;但许多研究已经证明[16-17]同心环隙在存在温差时其表面热流与角度有关,因此在本研究中柱坐标下巷道围岩的非稳态方程为

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{1}{r_i} \frac{\partial T_i}{\partial r_i} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial {r_i}^2} + \frac{1}{{r_i}^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta^2} \right), (i = 1,2,3) \tag{1}$$

边界条件为

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_1 - T_f) \quad (r = r_1) \tag{2}$$

$$\begin{cases} T_1(t,r) = T_2(t,r) \\ \lambda_e \dfrac{\partial T}{\partial r} = \lambda_1 \dfrac{\partial T}{\partial r} \end{cases} \quad (r = r_2) \tag{3}$$

$$\begin{cases} T_2(t,r) = T_3(t,r) \\ \lambda_2 \dfrac{\partial T}{\partial r} = \lambda_e \dfrac{\partial T}{\partial r} \end{cases} \quad (r = r_3) \tag{4}$$

初始条件为

$$\begin{cases} T_3(t,\infty) = T_{gu} \\ T_i(0,r) = T_{gu} \end{cases} \tag{5}$$

式中:T_i为第 i 层介质的温度,℃;T_{gu}为围岩的原始岩温,℃;T_f为巷道内风流的温度,℃;t 为通风时间,s;r_1 为巷道半径,m;r_2 为保温层外侧(空气层内侧)半径,m;r_3 为空气层外层半径,m;ρ_i 为第 i 层介质的密度,kg/m^3;c_i 为第 i 层介质的比热,J/(kg·K);λ_i 为第 i 层介质的导热系数,W/(m·K);λ_e 为封闭空气夹层内自然对流等效导热系数[16],$\lambda_e = \dfrac{Q\ln(r_3/r_2)}{2\pi(T_3 - T_2)}$,W/(m·K);$\theta$ 为圆形巷道的极轴角(取重力反方向为0°)。

式(1)~式(5)为具有封闭空气隔热层的巷道围岩物理模型的方程组,由于封闭空气夹层内外壁面存在温差时会引起自然对流换热,环隙内对流换热强度与温差和间隙宽度有关,难以直接求得其解析解,因此采用 ANSYS Fluent 软件(版本 16.2)来求解这一问题,该软件对于自然对流换热求解的适用性已在文献中得到了大量的验证[18-19],作者也将通过试验验证数值计算结果的正确性。

2 巷道围岩温度场模拟试验系统与数值计算

2.1 相似模拟试验

根据相似准则,并参考其他学者的研究[8,20]设计巷道空气夹层隔热相似模拟试验平台,如图2所示

示。该平台包括 3 个部分：风流参数控制系统、巷道围岩主体和数据监控与采集系统。风流参数控制系统为定制设备，可控制风流温度，其具体参数为：温度 20 ℃ ~50 ℃，相对湿度 30% ~80%；精度为温度 ±2℃，相对湿度 ±(3 ~5)%，制冷量 5 kW，风量 2 000 m^3/h，风压 500 Pa，风量采用变频风机调节。试验模型的相似比为 10∶1，围岩模型主体尺寸为截面 1 m×1 m(宽×高)，长 3 m，围岩模型主体采用 4 mm 厚的不锈钢板围成，不锈钢板外侧四面覆盖可控温的硅橡胶板用以加热，温度可调节范围为 35 ℃ ~70 ℃，功率 20 kW，硅橡胶板与送风管道表面外均贴有 50 mm 厚的保温材料。模拟巷道是直径为 320 mm、厚度为 15 mm 的不锈钢圆筒，在围岩和不锈钢圆筒之间用 5 mm 厚钢板隔出 20 mm 厚的空气隔热层。模型主体内填充黏土、河沙、石英砂和铁粉的混合物用来模拟围岩，其中铁粉的作用是提高混合物的导热性，其质量比例为土壤∶河沙∶石英砂∶铁粉 = 13∶13∶1∶1。将上述混合物制成试块，充分干燥后，使用上海和晟 HS-DR-5 型瞬态平面热源法导热仪测得其导热系数为 0.43 W/m·℃，导温系数为 1.18×10^{-6} m^2/s。

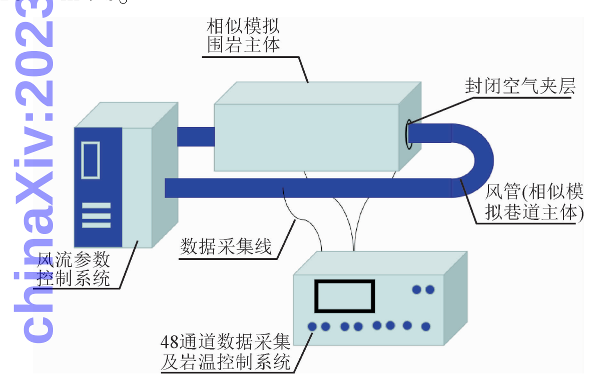


图 2 巷道空气夹层隔热相似模拟试验平台

Fig. 2 Experimental platform for similar simulation of roadway air layer insulation

数据监控系统为 48 通道的美控数据采集器，可以采集相关信号，实现数据自动传输，每 4 min 记录一次数据。本试验采用铂电阻测量模型主体内部温度，测温范围 -50 ℃ ~300 ℃，测量精度 ±0.1 ℃，温度传感器在模型主体中布置截面，各传感器间距如图 3 所示，考虑到岩层中的温度梯度分布，侧面近巷道处测点布置更密集。

试验时，巷道围岩原始温度取 40 ℃，巷道内风流温度设定为 20 ℃，先开启硅胶加热板，等待围岩内部温度均稳定在 40 ℃后，再开启主巷道风机和制冷设备，试验期间平均风温为 20.32 ℃，同时测得平均风速为 7.68 m/s。

2.2 数值计算方法和参数设定

由于试验平台中的巷道是厚度为 15 mm 的圆形钢管，其热阻可忽略，因此在模型中，围岩与巷道风流之间仅存在封闭空气隔热夹层。没有保温层的影响，更有利于分析封闭空气隔热夹层对围岩温度场分布和围岩总散热量的影响。如图 3 所示的物理模型，所考虑的同心圆柱环由半径为 r_2 的内圆柱和半径为 r_3 的外圆柱组成。圆环内壁面和长方体外围壁面温度恒定，分别为 T_2 和 T_3。本研究中，内外壁面温差与体积膨胀系数远远小于 1，因此采用 Boussinesq 近似，忽略除浮升力项外的其他力的影响，密度仅随温度变化，能量方程中的黏性耗散也被忽略，并设定圆柱环内风流与围岩的接触面为流固耦合面。

如图 3 所示，O 点为坐标原点，位于两个圆柱的中心，使 θ 的 0°指向与重力加速度 g 的方向相反，并取顺时针方向为 θ 的正方向。采用 ANSYS Fluent 软件的 CFD 模块用作求解器，采用 SIMPLE 算法进行求解，将围岩外壁面设为恒温界面，空气内壁面为对流换热边界。考虑到空气夹层内部会产生自然对流现象，空气夹层两侧设置为边界层，进一步加密处理，以保证计算精确性。

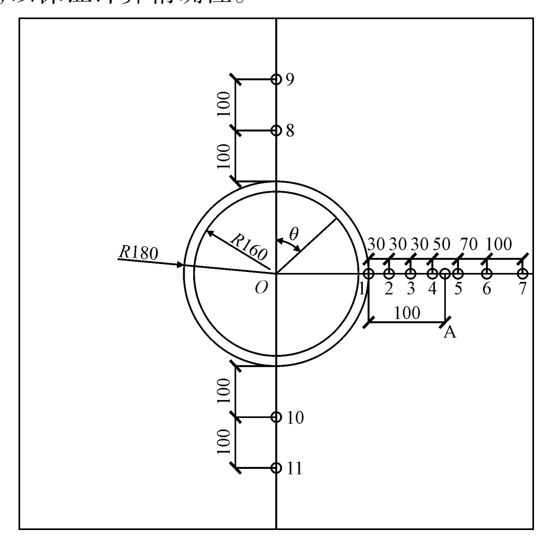


图 3 围岩内温度测点位置图

Fig. 3 The surrounding rock temperature measuring point locations

主巷道可视为光滑圆管，其对流换热系数根据文献[21]进行计算，测得试验条件风速为 7.68 m/s，计算如下。

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{7.68 \times 0.32}{15.06 \times 10^{-6}} = 163\ 186 \tag{6}$$

$$Nu = 0.0214(Re^{0.8} - 100)Pr^{0.4} = 272.6,$$
$$(0.5 < Pr < 1.5, 10^4 < Re < 5 \times 10^6) \qquad (7)$$

计算得对流换热系数为 22.7 W/m² · K。

表 1　数值计算参数

Tab. 1　Numerical calculation parameters

类别	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot ℃^{-1}$)	运动黏度/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	导温系数/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	对流传热系数/ ($W \cdot m^{-2} \cdot ℃^{-1}$)
主巷道空气	0.025 9	15.06×10^{-6}		22.6
夹层空气	0.026 7	16.00×10^{-6}		
围岩	0.431		1.18×10^{-6}	

3　结果比较

按照调温圈[8]的概念，定义 $\frac{|t_{gu} - t_f|}{t_{gu} - t_f} \geqslant 0.01$ 为调温圈。观测试验测量数据，在测点 7 即半径为 0.49 m处，4 h 20 min 以内温度在 39.8 ℃以上，因此为了确保边界条件的稳定性，取巷道围岩温度场 4 h 内试验数据与数值模拟结果进行对比分析，验证 ANSYS Fluent 软件计算结果在该问题上的准确性。

3.1　数值结算结果准确性

图 4 中描述了侧面不同测点温度数值计算结果和试验结果的比较，可以看出试验值与计算值吻合，最大误差在 0.2 ℃以内。其中壁面温度（测点 1）前 20 min 实测值略高于数值计算结果，这是由于开始制冷后，主巷道内风温并不能马上达到 20 ℃，8 min 后巷道内温度才降到 22.6 ℃，12 min 后降至 18.7 ℃，随后风温出现波动，最后稳定在 20.3 ℃ ~ 20.5 ℃。因此前期的风流温度高于计算值，但随着时间推移这种影响逐步减弱，最后趋于一致。

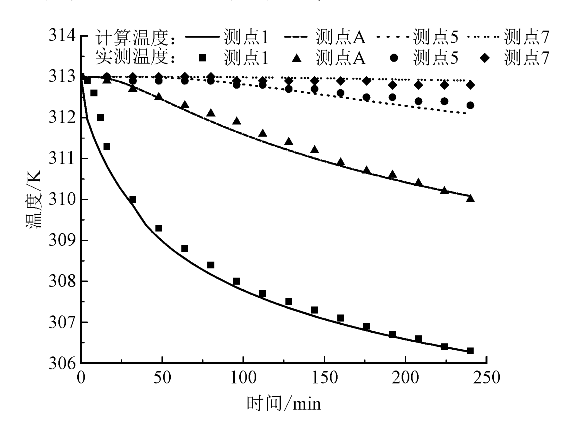


图 4　巷道围岩温度场随时间的变化

Fig. 4　Variation of temperature field in roadway surrounding rock with time

3.2　不同部位温度场差异性分析

从试验数据和数值计算结果中均可以看出围岩场内温度场并不是中心对称的，图 5 中的具体数据可以更为直观地反映这种差别，测点 A、8、10 分别测量围岩内左侧、上部和下部距圆心 28 cm 处温度。其中测点 A 为虚拟测点，为了方便与上、下部测点 8、10 比较，使用测点 3 和测点 4 的试验数据进行线性插值得到。从图 5 中试验 4 h 时可以看出，底部温度扩散得最快，降低了 4.2 ℃，而顶部的温度扩散得最慢，仅降低了 1.3 ℃。

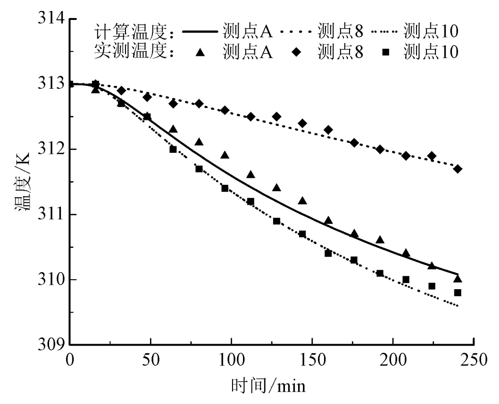


图 5　巷道围岩不同部位温度场随时间的变化

Fig. 5　Variation of temperature field in different parts of roadway surrounding rock with time

为了分析围岩内部温度分布随时间的变化，在 $\theta = 0°$、$\theta = 90°$和 $\theta = 180°$这 3 个方向在壁面上取点并向围岩内部延伸直至边界。各方向上温度分布在 4 min、10 min、1 h 和 4 h 温度分布如图 6 所示，该图也证实了其围岩内温度场分布不是中心对称的，仔细分析 0 ~ 0.02 m（空气层）范围内的温度分布，可以发现：在 $\theta = 0°$方向上温度分布呈线性分布；在 $\theta = 90°$方向温度开始向非线性分布转换；在 $\theta = 180°$方向在靠近空气层内外壁面边界层处温度梯度增大，而中间的温度梯度则很平缓。但各个位置空气夹层内外侧温度差值都很明显，在 4 h 时，在计算条件下（原岩与风流温差 19.7 ℃）$\theta = 0°$、$\theta = 90°$和 $\theta = 180°$这 3 个方向空气夹层内外侧温度差值分别为 15.4 ℃、11.13 ℃、9.59 ℃，表明空气夹层起到了良好的隔热作用，且顶部隔热效果更好。

空气夹层内外侧温差的差异是空气夹层自然对流现象导致的，国外有大量学者针对水平同心圆柱间的流体传热和流动特性进行了研究[16-19]。文献［22］中指出当加热面在下方、瑞利数大于 1 700 时自然对流现象就会出现，而加热面在上方时则不会

发生对流。对于巷道内空气夹层而言,顶部加热面在上方,因此几乎不会发生自然对流,传热近似于导热;而底部加热面在下方,自然对流现象明显。这也导致底部的传热系数高于顶部,使得底部的传热量更大,在相同的温差和时间内,底部围岩温度下降更快,温度扰动范围也更大。

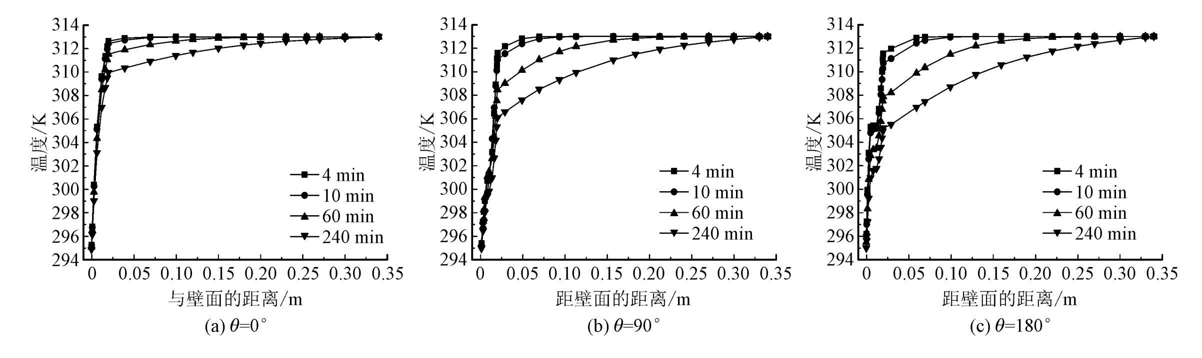


图 6 径向不同角度围岩温度分布随时间的变化

Fig. 6 The temperature distribution of surrounding rock at different radial angles varies with time

3.3 与无隔热巷道围岩温度场分布比较

为了使分析的结果更具有普遍意义,引入下列无因次准数,即

$$\begin{cases} \Theta = \dfrac{T - T_f}{T_{gu} - T_f} \\ R = (x + r_1)/r_1 \\ F_0 = \alpha\tau/r_1^{\ 2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:x 为调温圈半径,m,无隔热巷道调温圈根据文献[23]得 $x = 3.46\sqrt{\alpha\tau}$;$\Theta$ 为无因次温度;R 为调温圈无因次半径;F_0 为傅里叶数。

如图 7 所示,从该温度云图中可以看出,封闭空气夹层隔热巷道围岩内温度分布有一个显著不同于其他隔热方式的特点,其围岩内温度场分布不是中心对称的,由于空气夹层内外壁面温差引起的自然对流现象导致空气夹层导热系数在不同角度时不同。在 $F_0 = 0.1$ 时,围岩内调温圈分布近似椭圆形,围岩内部底部温度扩散最快,中部次之,顶部最慢。但随着通风时间的增长,调温圈向围岩深处扩散,这种差别逐渐降低,深部围岩内的等温线开始向圆形转变。

表 2 为不同傅里叶数下调温圈无因次半径比较。从表 2 中可以看出,存在封闭空气夹层的巷道调温圈半径均小于公式计算值,这是因为封闭空气夹层增加了风流与围岩之间的传热热阻,降低了围岩向风流的释热量,因此减缓了调温圈的扩散。

表 2 不同傅里叶数下调温圈无因次半径比较

Tab. 2 Comparison of dimensionless radii of thermostat with different F_0

F_0	调温圈近似半径无因次半径 $R = x/r_1$			
	$\theta = 0°$	$\theta = 90°$	$\theta = 180°$	无隔热层巷道
0.1	1.64	1.96	2.06	2.09
1	3.72	4.17	4.38	4.46
10	8.56	9.06	9.37	11.94
20	12.38	12.88	13.11	16.47
30	13.12	13.43	13.62	19.95

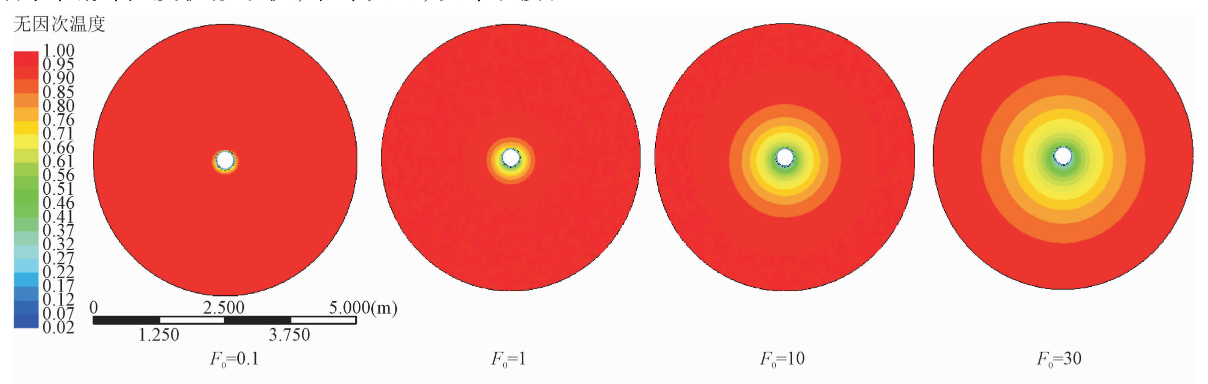


图 7 调温圈扩散深度随时间的变化云图

Fig. 7 Variation of heat regulating circle diffusion depth with time

4 实例分析

为了分析在实际工况中封闭空气夹层对传热量的影响，取湖南唐洞煤矿地质条件[11]进行计算，其围岩导热系数为 0.59 W/(m·K)，导温系数 1.13×10^{-6} m^2/s。以半径为 2 m 的圆形巷道为例，假设其巷道内对流换热系数为 14 W/(m·K)，风流平均温度为 26 ℃，原始岩温为 42 ℃，隔热层采用 50 mm 聚乙烯板，导热系数 0.072 W/(m·K)，计算了单位长度围岩散热量。考虑到巷道底部(1/4 圆周)无法使用封闭空气夹层结构进行隔热，根据文献[14] 和实验模型构建的实际工况计算模型(如图 8 所示)，隔热层通过固定锚杆和拱形钢带悬挂在巷道支护结构内侧，为了防止水渗入应在隔热材料表面铺设防水膜，固定螺栓与隔热材料的接头处用加热或 PVC 材料熔化密封，防止水渗入。为了满足防火需求，在隔热层内表面铺设金属网，并喷射 60 mm ~ 70 mm 厚的混凝土砂浆。无隔热围岩非稳态过程的传热计算理论已经相对成熟，故本研究仅讨论除底部外布置了封闭空气夹层结构周壁的传热量，其非稳态过程中的传热量可由式(9)进行计算，即

$$q = k_\tau (T_{gu} - T_f) \qquad (9)$$

式中 k_τ 为不稳定换热系数，W/(m^2·℃)。

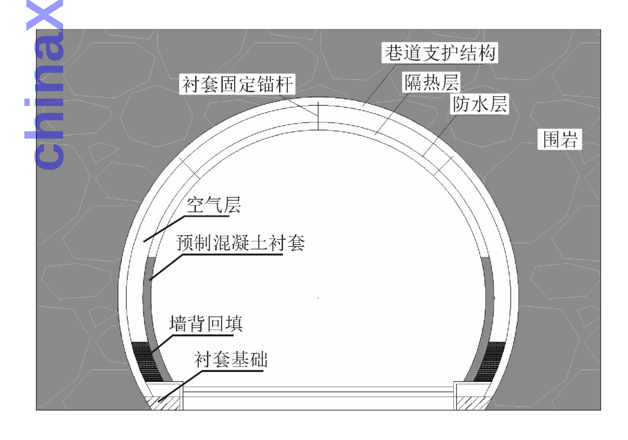


图 8 封闭空气夹层结构隔热巷道截面示意图

Fig. 8 Schematic diagram of insulated tunnel section with enclosed air

静止空气夹层的热阻与空气层厚度成线性关系，而自然对流现象却随着空气层厚度的增加而加剧，在二者综合影响下封闭空气夹层的热阻会随着空气层厚度的增加而增加，但增量不大，加上隔热板的存在这种影响会更加弱化。不同空气层厚度下，单位长度巷道围岩散热量如图 9 所示，通风初期，随着空气层厚度的增加散热量略有下降，空气夹层厚度由 2 cm 增至 12 cm，围岩单位长度散热量下降 4%，空气夹层厚度由 12 cm 增至 20 cm，围岩单位长度散热量仅下降 1%，随着通风时间的增长，厚度的影响逐渐减弱最后趋于一致。因此在实际工程中，可根据巷道空间大小和施工条件确定空气夹层的厚度，且后期巷道围岩即使发生变形也不会对其隔热效果产生大的影响，可维持空气夹层厚度为 20 cm 以便维修[14]。

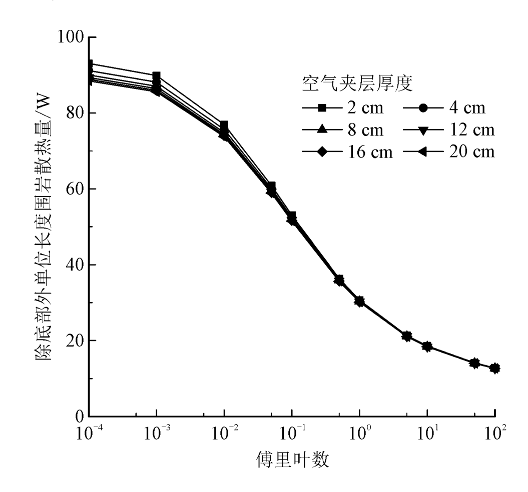


图 9 空气夹层厚度对围岩传热量的影响

Fig. 9 Effect of air layer thickness on heat dissipation of surrounding rock

在计算中发现，除通风时间外，围岩导热系数对空气夹层厚度的隔热效果也有明显影响，因此选择了物性差别较大的石英岩(导热系数为 6.18 W/(m·K)，导温系数 2.95×10^{-6} m^2/s)进行对比计算(其他条件与上述实例计算相同)。在空气夹层厚度为 20 cm 时，不同通风时间时空气夹层隔热率如表 3 所示，定义空气层夹层隔热率为

$$\Delta\% = \frac{q_0 - q}{q_0} \times 100\% \qquad (10)$$

式中：q_0 为无隔热时单位长度围岩散热量，W/m。围岩导热系数为 0.59 W/(m·K)的巷道中，通风 40 d 后封闭空气夹层隔热率下降到 29.8%；而围岩导热系数为 6.18 W/(m·K)的巷道中，通风 1 568 d 后封闭空气夹层隔热率仍高达 61.3%。可见空气夹层的隔热效果的衰减情况在岩石物性参数不同时差别明显，空气夹层结构对于新掘进巷道或隧道隔热效果显著；此外对于导热系数大的围岩隔热效果更明显。

表 3　空气夹层厚度为 20 cm 时不同通风时间的隔热率

Tab. 3　The thermal insulation rate of an air interlayer with a thickness of 20 cm at different ventilation time

F_0	岩石 1	通风时长	F_0	岩石 2	通风时长
0.01	72.0%	9.42 h	0.01	93.3%	3.76 h
0.1	47.3%	4.09 d	0.1	88.8%	1.56 d
1	29.8%	40.97 d	1	79.9%	15.68 d
10	21.5%	409.7 d	10	69.8%	156.8 d
100	16.7%	4 097 d	100	61.3%	1 568 d

注：岩石 1 为低导热系数岩石，导热系数 0.59 W/(m·K)，导温系数 1.13×10^{-6} m^2/s；岩石 2 为高导热系数岩石，导热系数 6.18 W/(m·K)，导温系数 2.95×10^{-6} m^2/s。

5　结　论

根据傅里叶定律和能量守恒定律，建立了含空气隔热夹层结构的围岩的传热模型，应用 ANSYS Fluent 软件对其围岩温度场进行了模拟计算；同时建立相应的试验台，进行了相关实验得出如下结论。

1）根据相似理论设计了巷道围岩温度场测试试验平台，利用试验结果对数值模拟结果进行了验证，试验结果和数值模拟结果吻合很好，最大误差低于 0.2 ℃。

2）因空气夹层内自然对流现象的存在，空气夹层顶部隔热效果最佳，底部最差；且因空气夹层的存在，风流对围岩的冷却效果减弱，减缓了调温圈的扩散，调温圈厚度小于无隔热巷道。

3）实例计算了空气夹层不同厚度的隔热效果，结果表明空气层厚度对围岩散热量影响较小，空气夹层厚度从 2 cm 增加到 20 cm 围岩单位长度散热量仅下降 5%。

4）在导热系数较低的围岩巷道空气夹层隔热效果衰减比导热系数高的围岩巷道快。封闭空气夹层隔热结构适用于巷道的临时性隔热或围岩导热系数高的固定作业或半固定作业地点的永久性隔热。

参考文献

[1] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术，2017，49(2)：1-16.（XIE Heping. Research ideas and expected results of “deep rock mass mechanics and mining theory”[J]. Engineering science and technology，2017，49(2)：1-16（in Chinese））.

[2] 何满潮，张毅，严玉彪，等. 我国煤矿高碳行业低碳生产技术研究进展[J]. 太原理工大学学报，2010，41(5)：623-626.（HE Manchao，ZHANG Yi，YAN Yubiao，et al. Research progress on low carbon production technology in high carbon industry in China[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2010，41(5)：623-626（in Chinese））.

[3] 张习军. 我国矿井空调的现状及发展趋势[J]. 矿业安全与环保. 2014，41(1)：87-90.（ZHANG Xijun. Present situation and development trend of mine air conditioning in china[J]. Mining safety and environmental protection，2014，41(1)：87-90(in Chinese)）.

[4] 蔡美峰，薛鼎龙，任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报，2019，41(4)：4-13.（CAI Meifeng，XUE Dinglong，REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese journal of engineering，2019，41(4)：4-13（in Chinese））.

[5] 李国富. 高温岩层巷道主动降温支护结构技术研究[D]. 太原：太原理工大学，2010.

[6] 庞建勇，姚韦靖. 深井煤矿高温巷道新型隔热材料试验研究[J]. 矿业研究与开发，2016，36(2)：76-80.（PANG Jianyong，YAO Weijing. Experimental research on a new thermal insulating material for high-temperature roadway in deep coal mine[J]. Mining research and development，2016，36(2)：76-80(in Chinese)）.

[7] 孙广龙. 深井高温巷道围岩阻热混凝土性能试验研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2016.

[8] 张源. 高地温巷道围岩非稳态温度场及隔热降温机理研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2013.

[9] 宋东平，周西华，白刚，等. 高温矿井主动隔热巷道围岩温度场分布规律研究[J]. 煤炭科学技术，2017，45(12)：107-113.（SONG Dongping，ZHOU Xihua，BAI Gang. Study on temperature field distribution law of surrounding rock in active thermal insulated roadway of high temperature mine[J]. Coal science and technology，2017，45(12)：107-113(in Chinese)）.

[10] YAO W，PANG J，MA Q，et al. Influence and sensitivity analysis of thermal parameters on temperature field distribution of active thermal insulated roadway in high temperature mine[J]. International journal of coal science & technology，2021，8(1)：47-63.

[11] 邹声华，李孔清，张登春，等. 掘进巷道隔热分流排热降温技术的理论与实践研究[J]. 安全与环境学报，2016，16(2)：99-102.（ZOU Shenghua，LI Kongqing，ZHANG Dengchun，et al. Theoretical and practical research on heat removal and heat removal technology for driving roadway[J]. Journal of safety and environment，2016，16(2)：99-102(in Chinese)）.

[12] SAADATIAN O，SOPIAN K，LIM C H，et al. Trombe walls：A review of opportunities and challenges in research and development[J]. Renewable & sustainable energy reviews，2012，16(8)：6340-

6351.

[13] SUSANTI L, HOMMA H, MATSUMOTO H. A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building[J]. Energy & buildings, 2011, 43(1):211-218.

[14] EINAR B, EIVIND G, KJELL I K, et al. The inner lining system in Norwegian traffic tunnels[J]. Tunneling & underground space technology, 2002, 17(3):305-314.

[15] 侯祺棕,沈伯雄.调热圈半径及其温度场的数值解算模型[J].湘潭矿业学院学报,1997,12(1):9-16.(HOU Qizong, SHEN Boxiong. The calculation of model the radius of control heat circle and its temperature field[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1997, 12(1):9-16 (in Chinese)).

[16] TEERTSTRA P, YOVANOVCH M M. Comprehensive review of natural convection in horizontal circular annuli[C]//The Proceedings of the 7th AIAA/ASME Joint Thermo-physics and Heat Transfer Conference. Waterloo: Microelectronics Heat Transfer Laboratory Department of Mechanical Engineering University of Waterloo, 1998.

[17] KUEHN T H, GOLDSTEIN R J. An experimental study of natural convection heat transfer in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli[J]. Journal of heat transfer, 1978, 100(4):635-639.

[18] GANGA W, KRUNAL M. Computa-tional analysis of mixed convection heat transfer characteristics in lid-driven cavity containing triangular block with constant heat flux: Effect of prandtl and grash of numbers[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 105:34-57.

[19] YU Z T, XU X, HU Y C, et al. Transient natural convective heat transfer of a low-Prandtl-number fluid inside a horizontal circular cylinder with an inner coaxial triangular cylinder[J]. International journal of heat & mass transfer, 2010, 53(23/24):5102-5110

[20] 秦跃平,王浩,郭开元,等.巷道围岩温度场有限体积法模拟计算及实验分析[J].煤炭学报,2017,42(12):3166-3175.(QIN Yueping, WANG Hao, GUO Kaiyuan, et al. Simulation of finite volume method and ecperimental analysis for temperature field of road way surrounding rock[J]. Journal of China coal society, 2017, 42(12):3166-3175 (in Chinese)).

[21] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[22] OSTRACH S. Natural convection in enclosures[J]. Journal of heat transfer, 1988, 8(110):1175-1190.

[23] 杨德源,杨天鸿.矿井热环境及其控制[M].北京:冶金工业出版社,2009.

(编辑　张璐)